

Fyzika Zeme

- Úvodný kurz pre poslucháčov prvého ročníka bakalárskych programov v rámci odboru geológia
- 5. prednáška – základy termodynamiky, stavové veličiny, prenos tepla, plyny

Obsah prednášky:

- úvodné poznámky k termodynamike
- stavové veličiny (teplota, tlak, objem, hustota)
- prenos tepla
- geotermika
- plyny (ideálny plyn)
- stavová rovnica pre ideálny plyn
- reálny plyn)

THERMODYNAMICS AND STATISTICAL MECHANICS

(States of Matter – David L. Goodstein)

1.1 INTRODUCTION: THERMODYNAMICS AND STATISTICAL MECHANICS OF THE PERFECT GAS

Ludwig Boltzmann, who spent much of his life studying statistical mechanics, died in 1906, by his own hand. Paul Ehrenfest, carrying on the work, died similarly in 1933. Now it is our turn to study statistical mechanics.

Perhaps it will be wise to approach the subject cautiously. We will begin by considering the simplest meaningful example, the perfect gas, in order to get the central concepts sorted out. In Chap. 2 we will return to complete the solution of that problem, and the results will provide the foundation of much of the rest of the book.

The quantum mechanical solution for the energy levels of a particle in a box (with periodic boundary conditions) is

$$\varepsilon_{\mathbf{q}} = \frac{\hbar^2 q^2}{2m} \quad (1.1.1)$$

where m is the mass of the particle, $h = 2\pi\hbar$ is Planck's constant, and \mathbf{q} (which we shall call the wave vector) has three components: x , y , and z .

Termika

Náuka o teple - časť mechaniky zaoberajúcej sa atómovým a molekulovým pohybom hmoty, súbormi častíc, tepelnými zákonmi majúcimi štatistický charakter.

Rozdelenie termiky

- Termometria – definícia stupníc teploty a rôznych metód jej merania.
- Kalorimetria – meranie tepla chemických reakcií alebo fyzikálnych zmien.
- Termodynamika – zákony vzájomnej premeny tepla a iných foriem energie.

Základné pojmy: teplota – miera tepelného stavu telies,

teplo – objektívna príčina tohto stavu, forma energie, pohybová a vzájomná polohová energia elementárnych častíc látok, atómov a molekúl.

Termodynamika

Termodynamika sa zaoberá **vnútornou energiou** systémov (najmä tepelnou) a riadi sa určitými zákonmi. Je disciplínou popisujúcou zákonitosti tepla a tepelných dejov, vzťahy medzi veličinami - popisuje **makroskopický** stav tepelnej sústavy a zmeny týchto veličín pri fyzikálnych dejoch spojených s výmenou tepla medzi sústavou a jej okolím.

Dôležité sú tzv. **termodynamické zákony**.

Skupenstvo - makroskopický systém:

je charakteristika fyzikálneho stavu hmoty (najmä usporiadanosti častíc v nej) podľa teploty a tlaku. Závisí od vzťahu medzi kinetickou energiou častíc a energiou ich vzájomného pôsobenia.

Termodynamika

Termodynamické zákony:

1. **termodynamický zákon**: Nemôže existovať zariadenie (stroj), ktorý by trvale konal prácu bez zmeny vnútornej energie (napr. celkovej energie pohybu molekúl) alebo energie okolia (tzv. **perpetuum mobile 1. druhu**).

- je to v podstate zákon zachovanie energie aplikovaný v termodynamike

2. **termodynamický zákon**: Nemôže existovať zariadenie (stroj), trvale konajúci prácu iba „na účet“ trvalého ochladzovania telesa (tzv. **perpetuum mobile 2. druhu**).

ekvivalentná formulácia: **Samovoľne** môže teplo (tepelná energia) prechádzať iba z telesa teplejšieho na chladnejšie, nikdy opačne (dôležité je slovo „samovoľne“).

3. **termodynamický zákon**: Absolútnu nulu teploty nie je možné dosiahnuť nijakým termodynamickým procesom v konečnom čas (tzv. Nernstov teorém).

Pozn.:

Najnižšia, teoretická možná hodnota: absolútna nula: -273.15 °C

Stavové veličiny

Stav látok popisujú tzv. stavové veličiny (SV):

- teplota (T)
- tlak (p)
- objem (V)
- hustota (ρ)
- hmotnosť (m), resp. molárna hmotnosť ($M_m = m/n$)

kde n je látkové množstvo

- vnútorná energia (U)
- entropia (S)

Pozn.: Molárna (staršie mólová) hmotnosť udáva hmotnosť jednotkového látkového množstva látky (1 mólu) – jednotka [g/mol], niekedy [kg/kmol].

Teplota

Teplota (termodynamická teplota) je jednou zo siedmich základných veličín sústavy SI. Je to stavová veličina opisujúca strednú kinetickú energiu častíc. Zmenou teploty sa menia vlastnosti rôznych látok (napr. tlak, objem, elektrický odpor, ...).

Teplota vo fyzike sa meria v jednotkách Kelvin [K], v bežnom živote sa z praktických dôvodov častejšie používa **stupeň Celzia** alebo **stupeň Fahrenheita**.

Spodné ohraničenie teplotnej stupnice je tzv. **absolútna nula**. Označuje termodynamickú teplotu, pri ktorej dosiahne entropia systému minimálne hodnoty. Podľa medzinárodnej dohody je definovaná ako 0 K na Kelvinovej stupnici, resp. -273.15 °C alebo -459.67 °F .

Pozn.: Tzv. normálna (izbová) teplota: 20 °C .

Teplota

Zhrnutie najpoužívanejších stupníc teploty:

Kelvinova stupnica T (K)

! Používa sa len Kelvin a nie stupeň Kelvina.

Celsiova stupnica T_C ($^{\circ}\text{C}$)

(absolútna veľkosť 1 stupňa v Celsiovej a Kelvinovej stupnici je rovnaká t.j. $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$) prevod: $T_C = T - 273.15$

Fahrenheitova stupnica T_F ($^{\circ}\text{F}$)

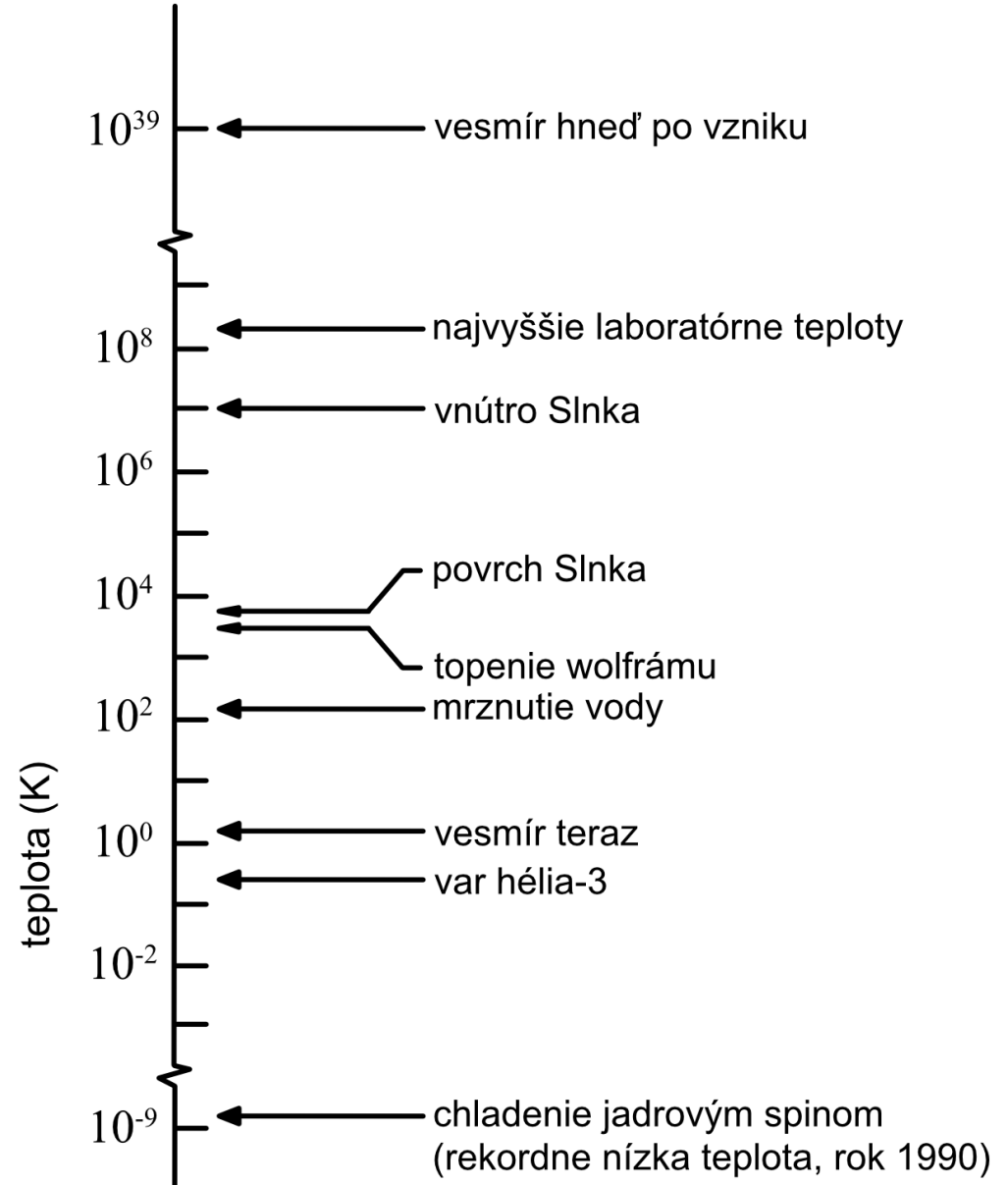
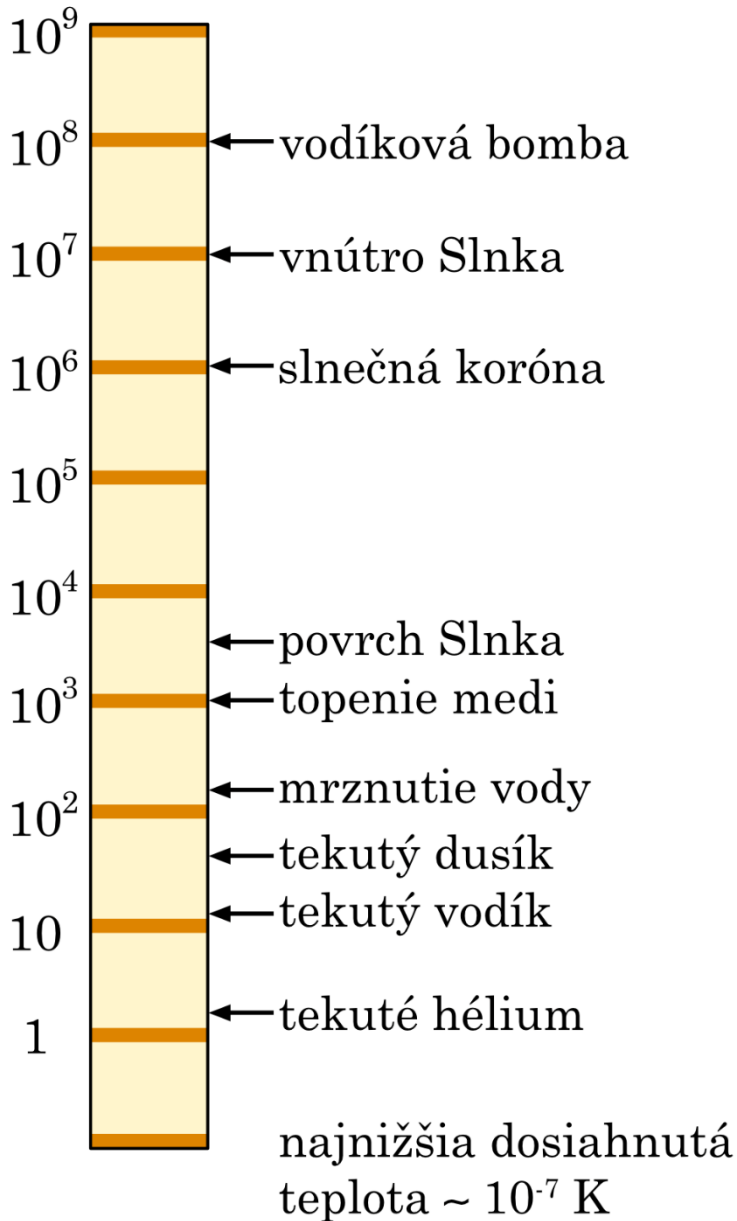
prevod: $T_F = 9/5 T_C + 32$ (prírastok na 9°F je 5°C)

Niektoré význačné teploty (v Kelvinoch, $^{\circ}\text{C}$ a $^{\circ}\text{F}$)

Teplota:	K	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
varu vody	373,15	100	212
telesná	310,15	37	98,6
v miestnosti	330,15	20	68
mrznutia (vody)	273,15	0	32
absolútna nula	0	-273,15	-459,67

Teplota

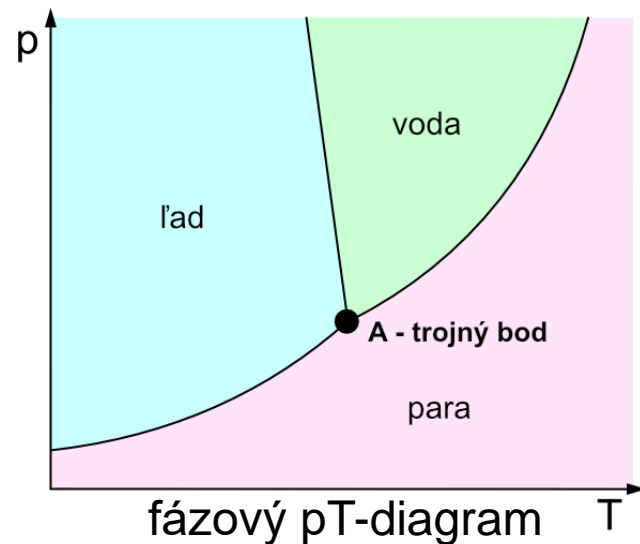
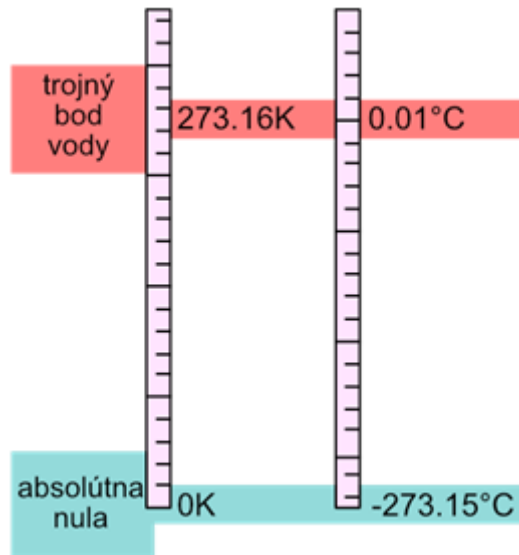
Teplota (K)



Teplota

Trojný bod látky je hodnota teploty a tlaku vo fázovom diagrame, pri ktorom súčasne existujú všetky tri skupenstvá tejto látky (plynné, kvapalné a pevné) za termodynamickkej rovnováhy.

Trojný bod vody sa používa na definíciu Kelvina, jednotky SI termodynamickkej teploty. Voda tento stav dosiahne pri teplote $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku $611,73\text{ Pa}$. Kelvin je $1/273,15$ termodynamickkej teploty trojného bodu vody.



Teplota

trojný bod rôznych látok

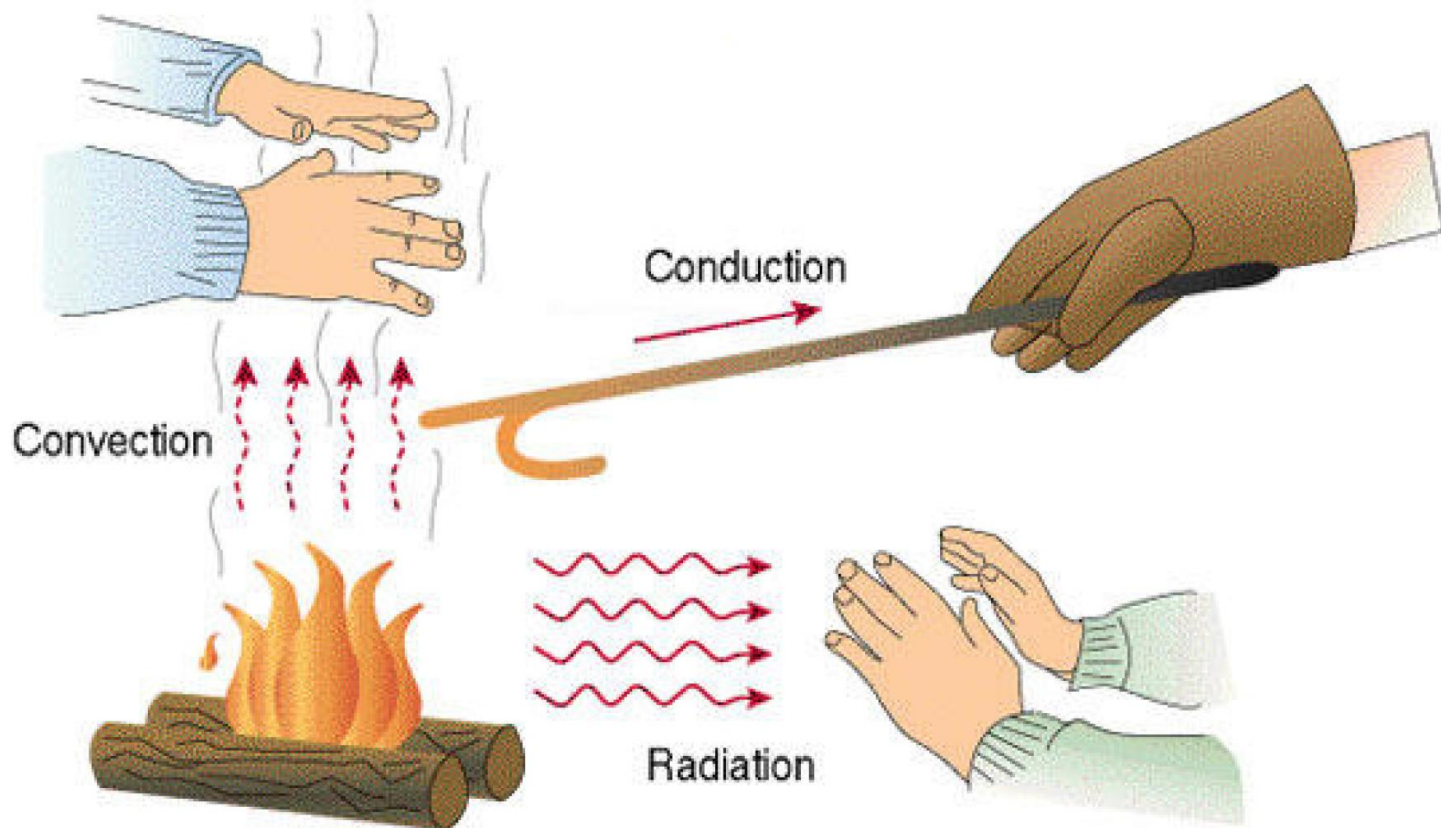
Látka	Teplota [°C]	Tlak [kPa]
etanol	-123	4.3×10^{-7}
kyslík	-218.7916	0.14625
ortuť	-38.8344	1.65×10^{-7}
oxid uhličitý	-56.60	517
platina	1 772	2×10^{-4}
radón	-71	70 kPa
uhlík (grafit)	4 492	10 132
vodík	-259.3467	7.04 kPa

Pozn.: normálny (atmosférický) tlak je 101.325 kPa.

Prenos tepla

Mechanizmy prenosu tepla:

1. vedenie (cez pevné látky) - *conduction*
2. prúdenie (prenos tepla hore – kvapalina, plyn) – *convection*
3. žiarenie (EM prenos) - *radiation*



Prenos tepla

vedenie tepla

TABLE 17.5 Thermal conductivities

Material	k (W/m K)
Diamond	2000
Silver	430
Copper	400
Aluminum	240
Iron	80
Stainless steel	14
Ice	1.7
Concrete	0.8
Glass	0.8
Styrofoam	0.035
Air (20°C, 1 atm)	0.023

Tepelná vodivosť k – vlastnosť látky viesť teplo. Predstavuje rýchlosť, s ktorou sa teplo šíri zo zahriatej časti látky do chladnejšej.

Jednotka: $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

Najviac dobrých vodičov tepla je medzi kovmi (aj vysoká el. vodivosť).

Výnimkou je diamant.

Využitie je napr. na chladenie elektronických obvodov (chipov).

Dobrá tepelná vodivosť zapríčiňuje aj pocit chladu na kovovej stoličke oproti drevenej.

Vzduch a plyny sú slabé vodiče tepla.

Prenos tepla

konvekcia - prúdenie



V plynoch a kvapalinách dochádza ku vzájomnému pohybu jednotlivých častí, ktoré majú rozdielnu teplotu a tým, aj rôznu hustotu (prejav vnútornej energie) - tým sa prenáša teplo.

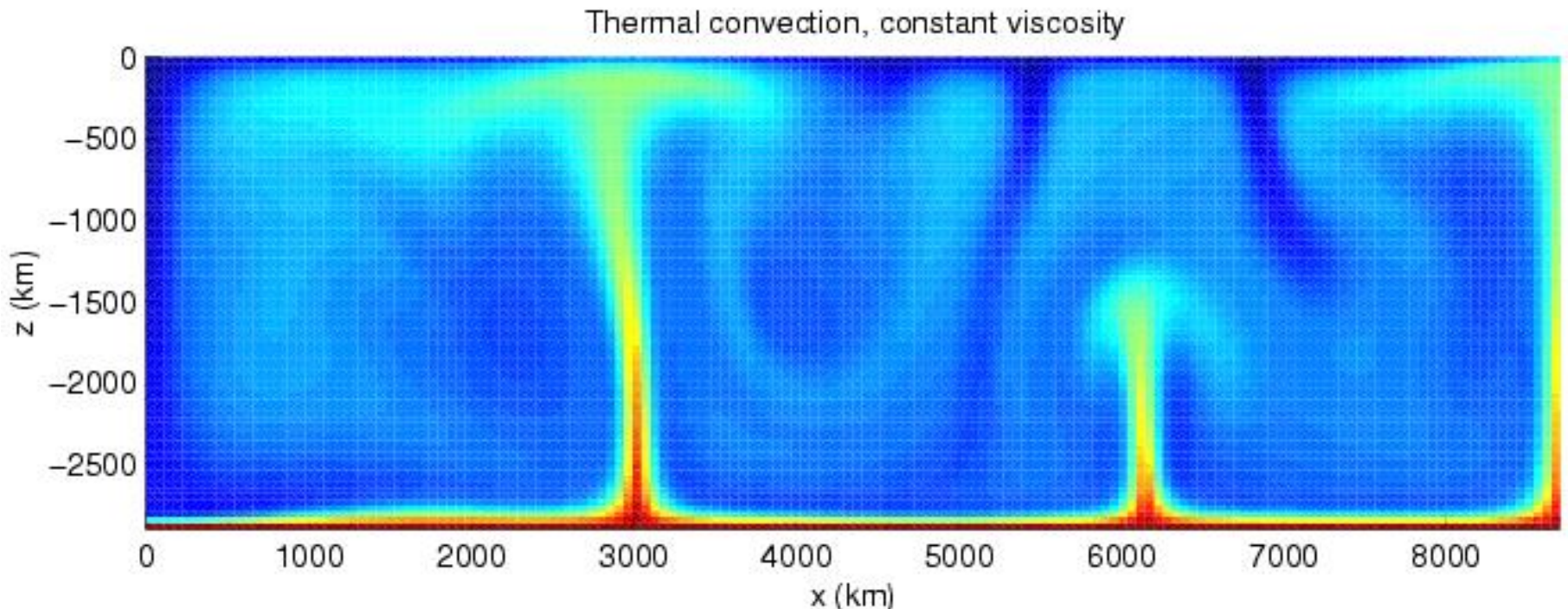
Je to celé dôsledkom skutočnosti, že kvapaliny a plyny (najmä vzduch) sú slabé vodiče tepla.

Konvekcia je značne rýchlejšia vo vode ako vo vzduchu (príkladom je napr. možnosť dlhodobého prežitia v 20 stupňovom vzduchu a úmrtia na hypotermiu v 20 stupňovej vode).

Prenos tepla

konvekcia - prúdenie

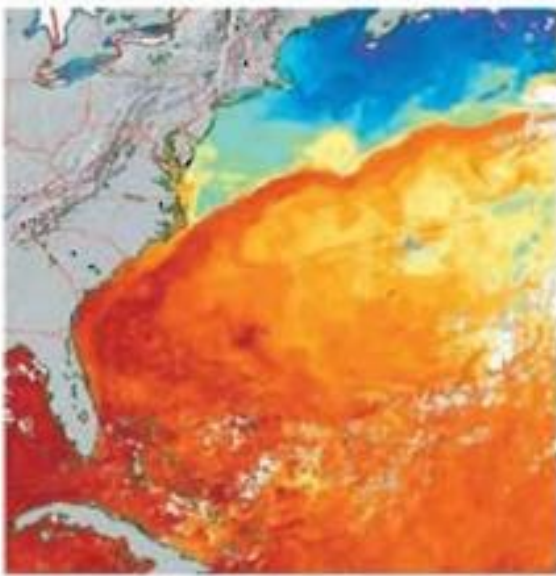
Význam konvekcie v platňovej tektonike – výnos teplého plášťového materiálu smerom nahor (najmä v oblasti oceánskych chrbtov, ale aj na viacerých bodových miestach – tzv. *plumes*).



numerický model konvekcie plášťových hmôt (teplé – červené farby zodpovedajú vyšším teplotám, studené – modré nižším)

Prenos tepla

radiácia - vyžarovanie



**satelitná
termo-snímka
západnej časti
Atlantického
oceánu**

Radiácia je proces, pri ktorom látka emituje do priestoru energiu vo forme elektromagnetického žiarenia. Na rozdiel od vedenia tepla a konvekcie sa môže prostredníctvom radiácie prenášať teplo aj vo vákuu.

Prenesená energia závisí od niekoľkých faktorov:

teplota telesa (platí tu tzv. Planckov zákon),
farba povrchu – najmenšie množstvo tepla je vyžarované strieborne lesklými povrchmi, najväčšie čiernymi (napr. termosky a termo-hrnčeky majú často povrch striebornej farby)
obsah plochy – vyžiarená energia je priamo úmerná veľkosti povrchu vyžarujúceho telesa.

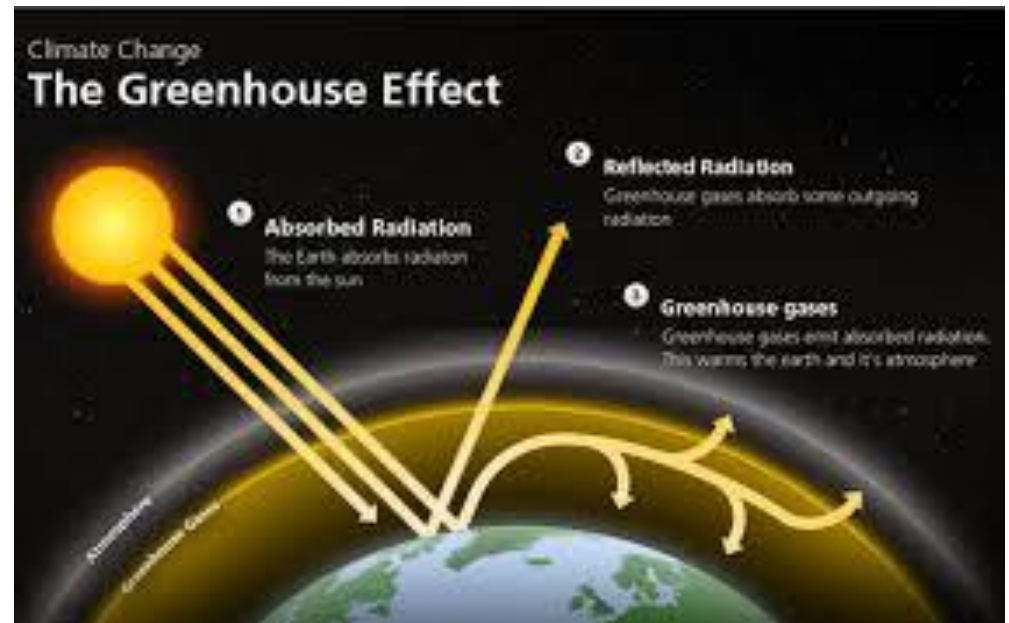
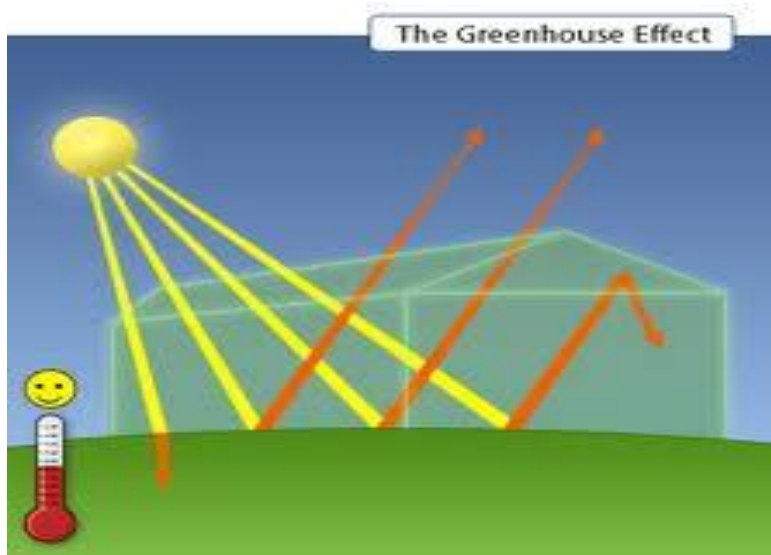


rozdiel cca 6 °C

Prenos tepla

radiácia - vyžarovanie

skleníkový efekt



Termálna radiácia hrá významnú úlohu pri globálnom otepľovaní, nakoľko je ovplyvnená prítomnosťou najmä vodnej pary a kysličníka uhličitého v zemskej atmosfére.

Geotermika

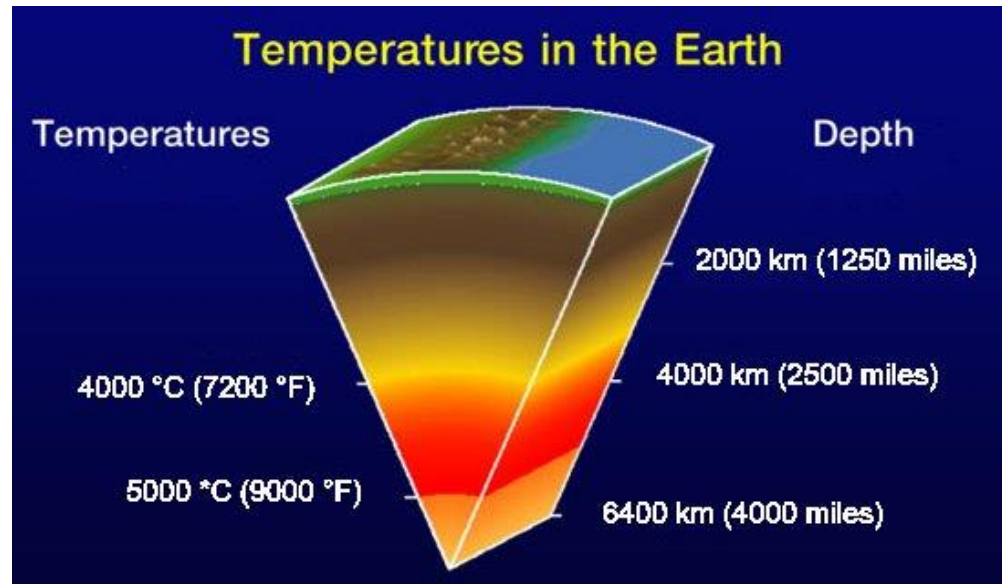
Geotermika je geofyzikálna metóda, ktorá vyšetruje teplotné pole Zeme (medzi iným meranie teploty na povrchu zemského telesa a určovanie hustôt tepelného toku).

Hlavné zdroje tepla v Zemi:

- rádiogénne teplo
- geochemické teplo
- spôsobené rastúcim litostatickým tlakom
- „počiatočné“ teplo Zeme
- teplo zo slnečného žiarenia

Prenos tepla:

- uplatňuje sa prenos tepla vedením a konvekciou



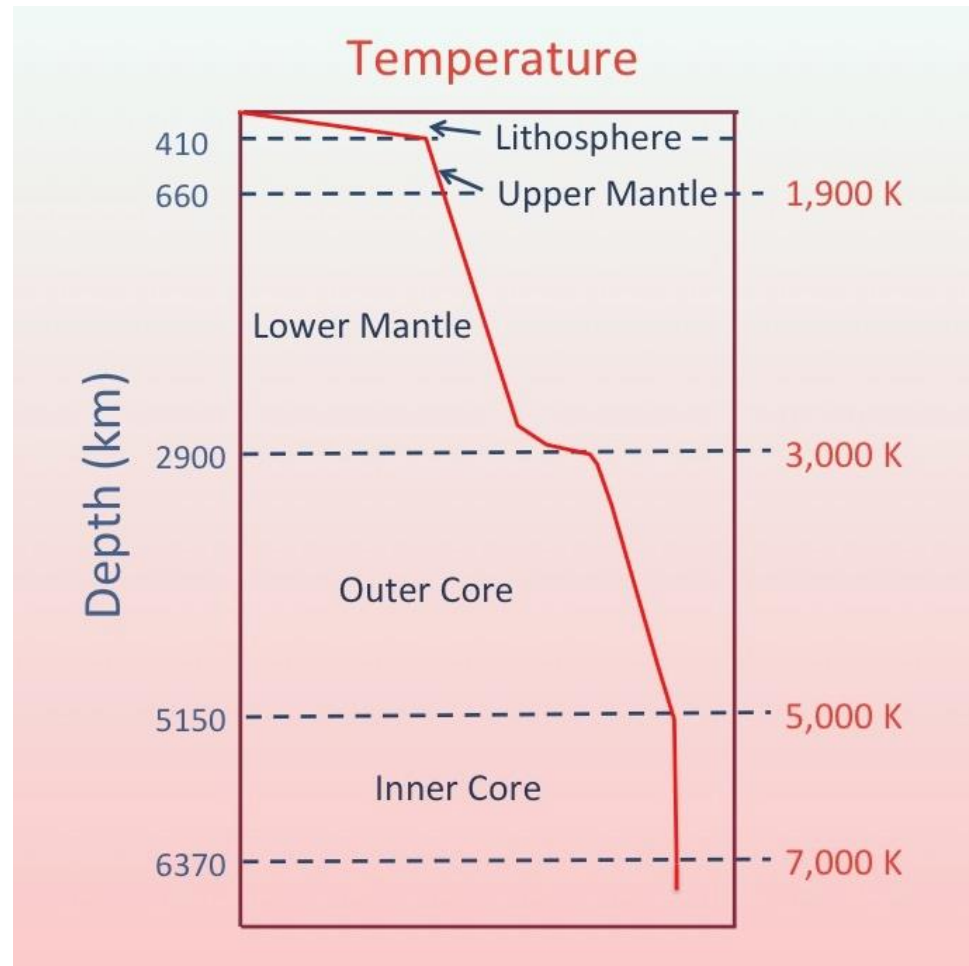
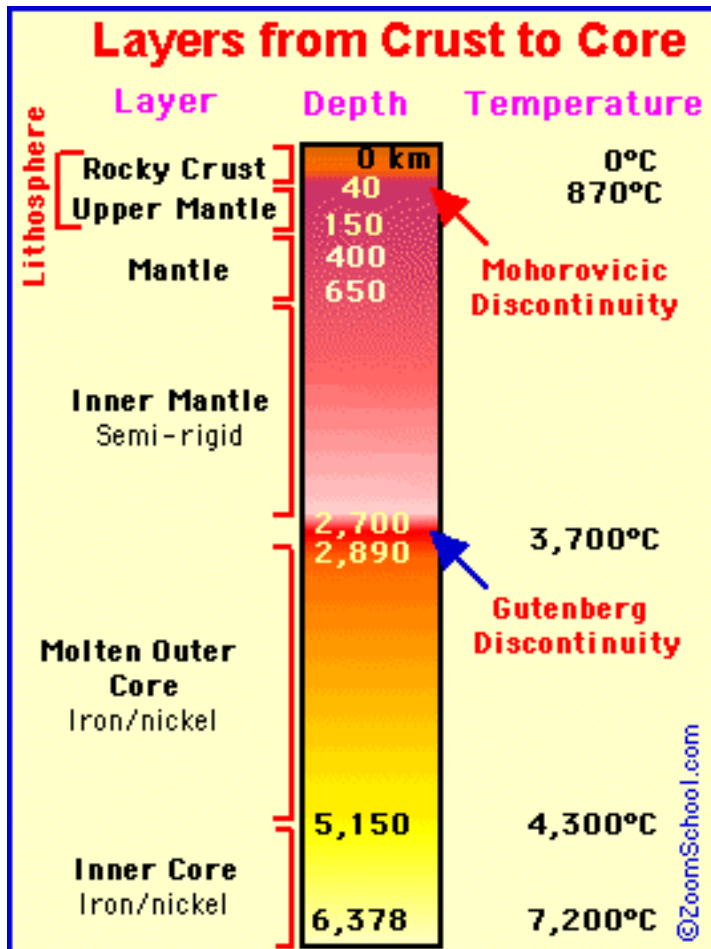
teplotné pole Zeme

Geotermika

geotermický gradient – $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$

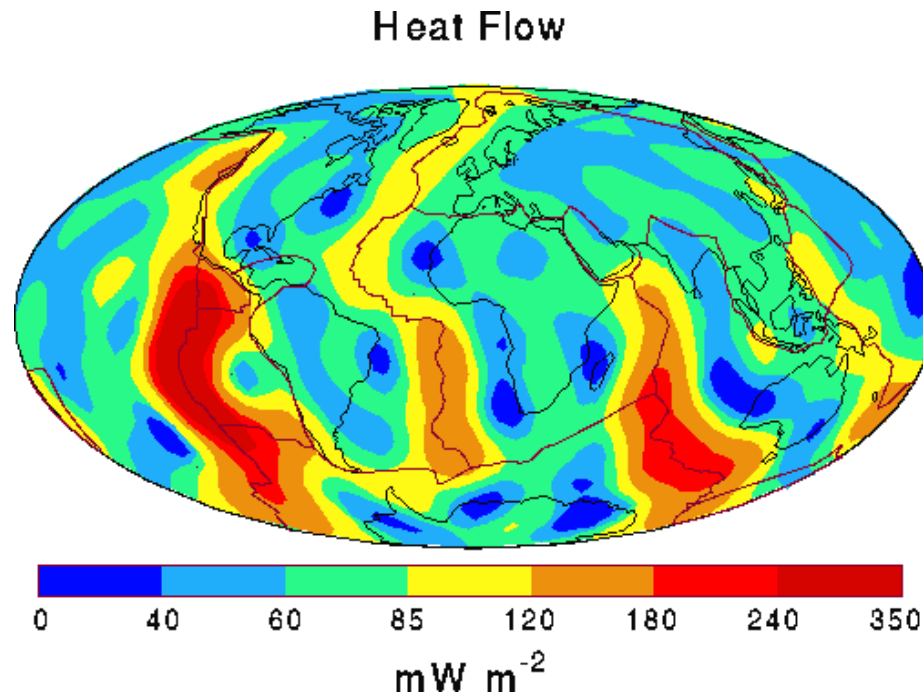
geotermický stupeň – $33\text{ m}/^{\circ}\text{C}$

(platí spoľahlivo pre prvé kilometre)

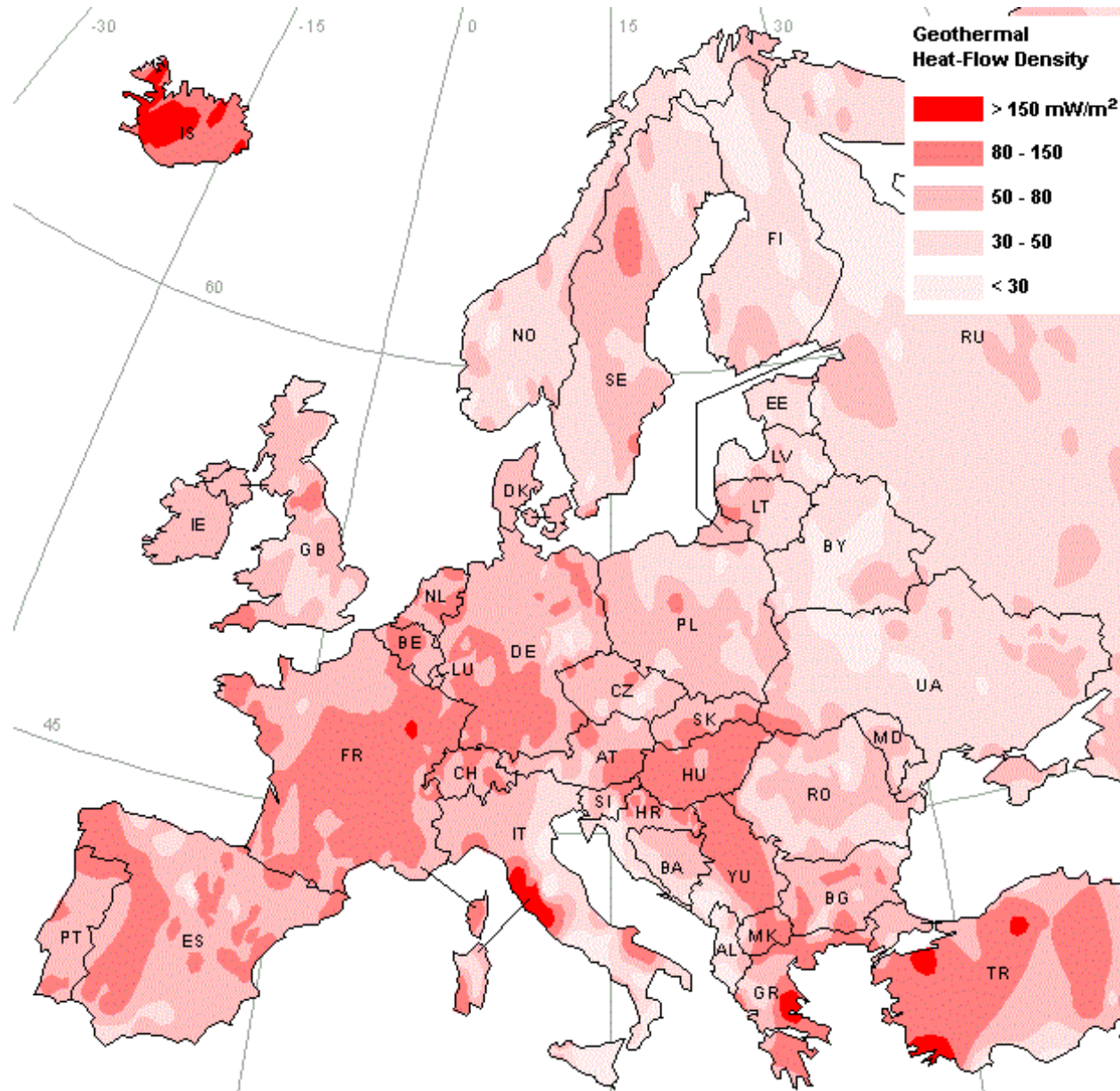


Geotermika

Hustota tepelného toku - množstvo tepla, ktoré prejde jednotkovou plochou, jednotka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], používané: [$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$].
Mapy hustôt tepelného toku (najvyššie hodnoty - vulkanické oblasti a oceánsky/kontinentálny rifting).



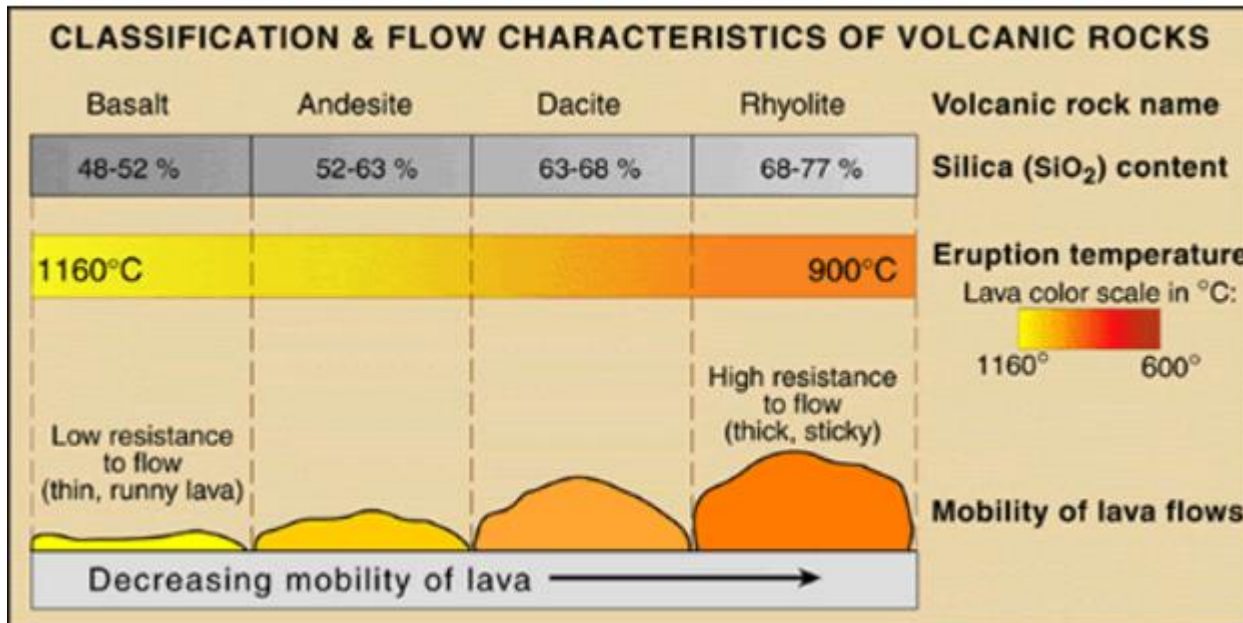
Geotermika



Európa - mapa hustoty tepelného toku

Geotermika

teplota lávy sa pohybuje zväčša v intervale od cca 600 do 1160 °C a závisí hlavne od bázicity (bázické lávy sú najhorúcejšie)

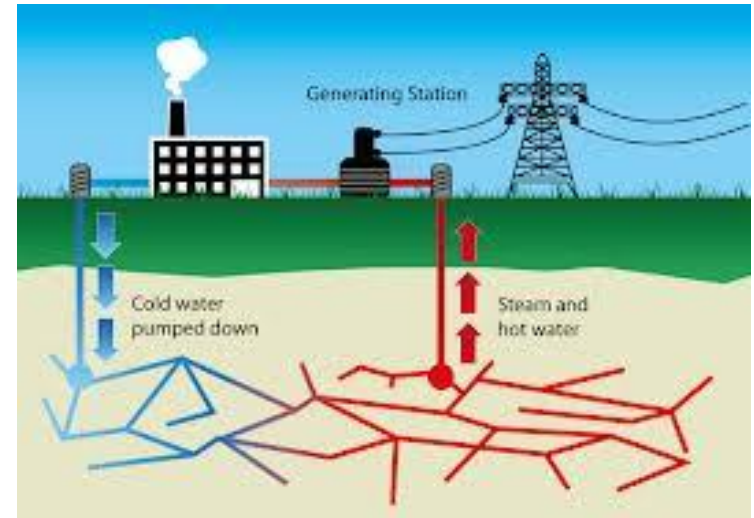
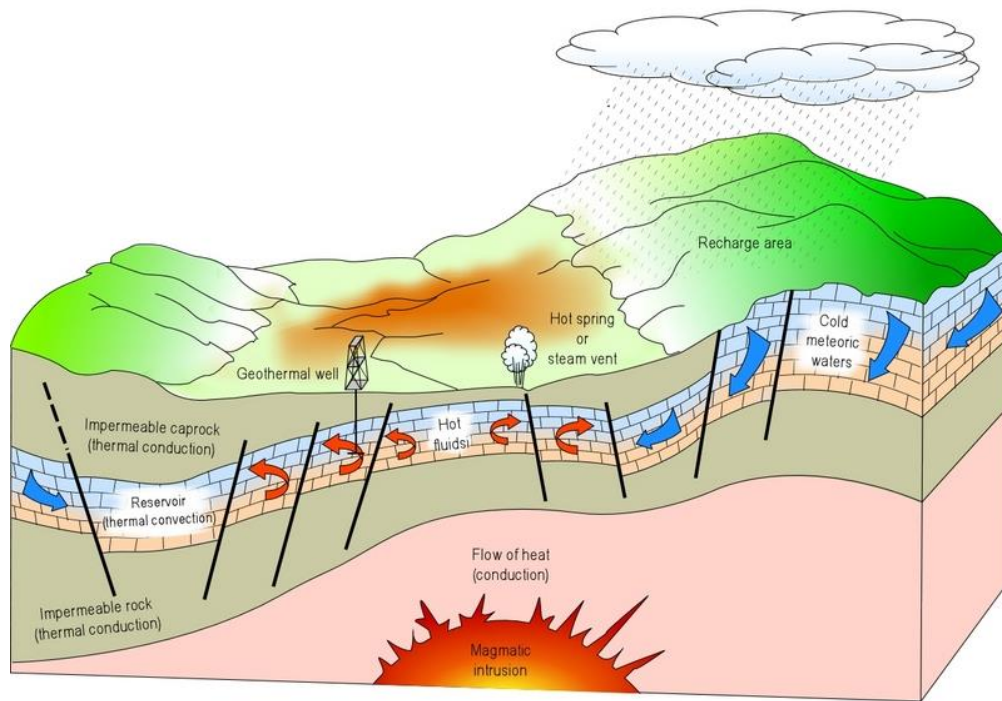


Geotermálna energia

Využíva geotermický gradient:

a) hydrotermálne zdroje (prirodzená teplá podzemná voda)

b) tzv. suché teplo (umelo natlačená voda v uzavretom cykle)



Tlak

Tlak je fyzikálna veličina, vyjadrujúca pomer sily F (tzv. tlaková sila) kolmo, rovnomerne a spojitô pôsobiacej na plochu a :

$$p = \frac{F}{a}$$

Jednotkou tlaku je Pascal [**Pa**], čiže Newton na meter štvorcový [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$].

Staršia jednotka je [bar], platí $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$.

Tlak neúčinkuje iba v bode pôsobenia sily, ale prenáša sa objemom telesa. Patrí k základným termodynamickým veličinám.

Tlak v plynôch je vyvolaný tepelným pohybom častíc plynu (atómov alebo molekúl); nárazy týchto častíc na steny nádoby sa prejavia pôsobiacim tlakom. Preto niekedy hovoríme o tzv. kinetickom tlaku - toto zvyrazňuje fakt, že hlavným dôvodom pre prítomnosť tlaku je skutočne pohyb molekúl.

Tlak

Hydrostatický tlak v plynch a kvapaliných je daný hmotnosťou horných vrstiev, ktoré v gravitačnom poli pôsobia silou na vrstvy pod nimi. Túto silu pôsobiacu na plochu nazývame hydrostatickým tlakom.

Atmosférický alebo **barometrický** tlak je špeciálnym prípadom hydrostatického tlaku vyvolaného hmotnosťou vzduchu tvoriaceho atmosféru. Pod vplyvom počasia atmosférický tlak mierne kolíše, preto bol zavedený takzvaný *štandardný atmosférický tlak* alebo *normálny tlak* s hodnotou 101 325 Pa (t.j. cca 100 kPa alebo 0.1 MPa) a je približne rovný priemernej hodnote tlaku na úrovni mora. Tlak v atmosfére klesá s nadmorskou výškou, pretože sa znižuje stĺpec vzduchu nad miestom merania.

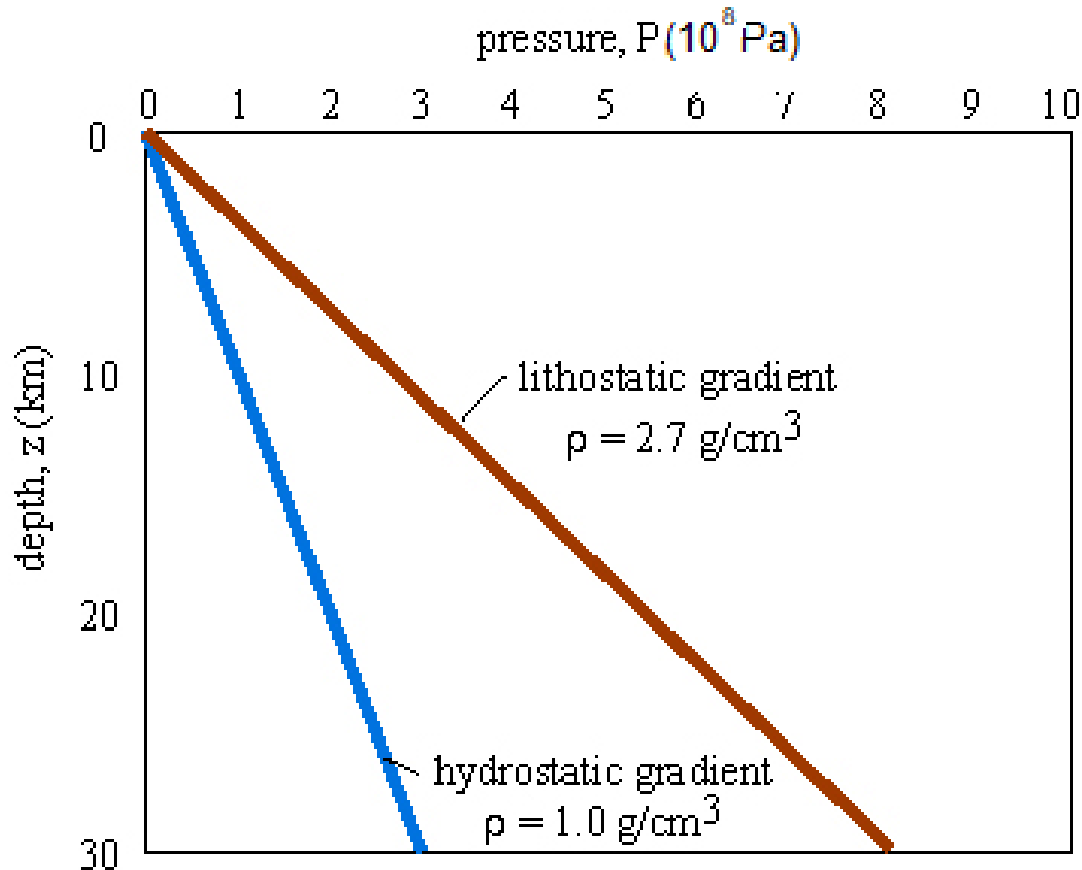
Litostatický tlak je tlak horných vrstiev hornín a používa sa pri modelovaní procesov v litosfére (napr. pri vysvetľovaní tzv. izostatickej rovnováhy).

Je možné vyjadriť ho ako súčin výšky a hustoty horninového bloku s gravitačným zrýchlením: $\rho \cdot h \cdot g$

Litostatický tlak

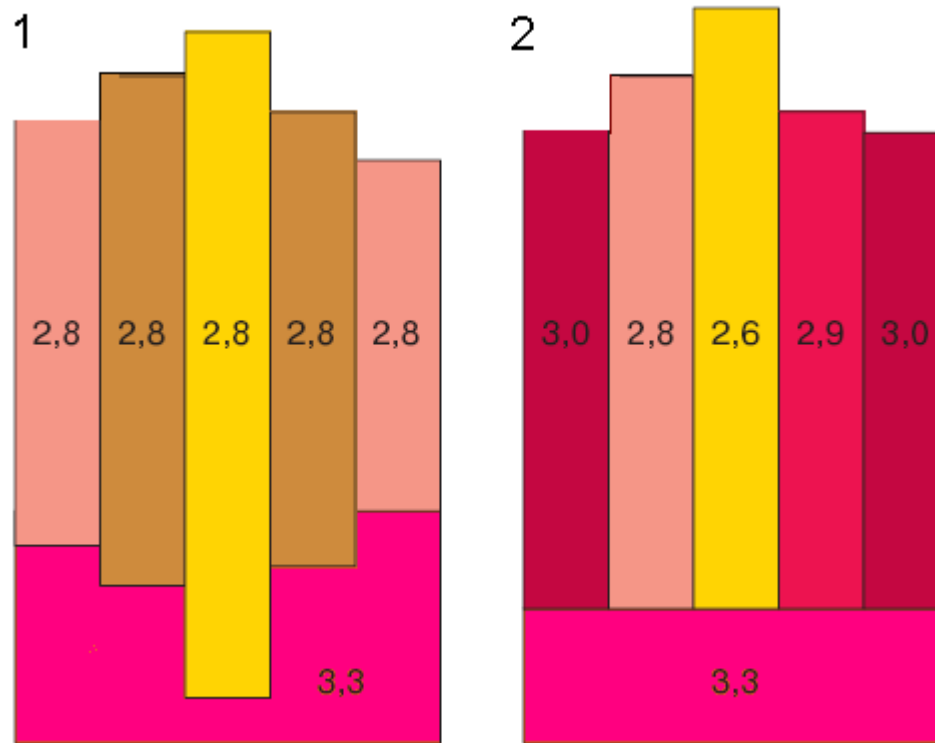
Litostatický tlak je tlak horných vrstiev hornín a používa sa pri modelovaní procesov v litosfére (napr. pri vysvetľovaní tzv. izostatickej rovnováhy).

Je možné vyjadriť ho ako súčin výšky a hustoty horninového bloku s gravitačným zrýchlením: $\rho \cdot h \cdot g$



Litostatický tlak

Izostázia predpokladá kompenzáciu litostatických tlakov od horninových celkov litosféry v určitej hĺbke (astenosféra).



tzv. Airyho model a Prattov model

Tlak

Tlakové (barometrické) výškomery umožňujú merať atmosférický tlak. Je to vlastne barometer (tlakomer), ktorý prepočítava tlak na výšku na základe matematického modelu štandardnej atmosféry a zobrazuje ju v jednotkách výšky [m n.m.].

Nevýhodou je, že sú závislé od momentálneho tlaku vzduchu v danej oblasti resp. na počasí – t.j. meranie je štandardne relatívne.

Využíva najmä v leteectve, ale aj v geológii a iných oblastiach vedy a techniky (aj v geodézii a geofyzike v menej civilizovaných častiach sveta – dnes je však tento prístup vytláčaný technológiou GPS).



tlakový výškomer v lietadle

Geologické procesy – súvislosti s teplotou a tlakom

Teplota a tlak hrajú dôležitú úlohu aj pri mnohých geologických procesoch od vzniku hornín až po súčasnosť.

- ovplyvňujú charakter a zloženie hornín pri ich vzniku ako aj počas následných procesov
- na základe procesov, ktoré môžeme vyjadriť **fázovými diagramami** ovplyvňujú chemické zloženie hornín a vznik rôznych minerálov pri kryštalizácii magmy a pri metamorfných procesoch
- laboratórne merania zmien fyzikálnych vlastností horninových vzoriek v závislosti od teploty a tlaku umožňujú presnejšie identifikovať ich minerálne zloženie a dajú sa získať dôležité informácie o podmienkach ich vzniku
- fyzikálne vlastnosti a niektoré ďalšie parametre sa prejavujú pri meraní geofyzikálnych polí.

Hustota

Hustota (špecifická hmotnosť) -
hmotnosť jednotkového objemu látky.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

kde: m je hmotnosť, V je objem.

fyzikálne jednotky pre hustotu:

system SI: $\text{kg}/\text{m}^3 = \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

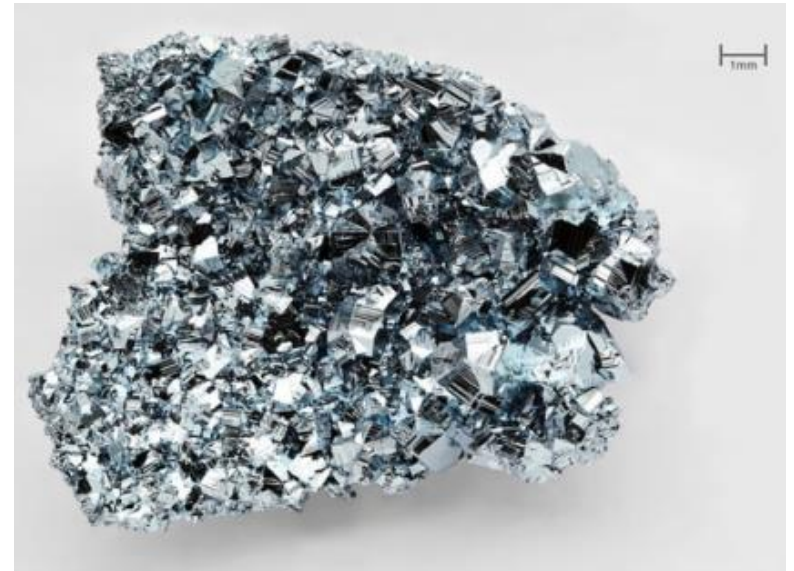
používané sú však násobky:

$$1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} = 1 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3} = 1 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3} = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

príklad : $2.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} = 2750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (fylit)

Hustota

Zaujímavosť: rozpätie hustôt v mineralógii -
od 0.98 (ľad) po 22.59 g·cm⁻³ (čisté Osmium)
(príklad: olovo: 11.34 g·cm⁻³ , zlato: 19.32 g·cm⁻³)



Entropia je fyzikálna veličina, ktorá meria neusporiadanosť (náhodnosť, neporiadok, mieru neurčitosti) systému. Jej jednotkou je [J/K] (Joul na Kelvin).

Plyny

Plyn alebo **plynné skupenstvo (látka)** je jedno zo základných skupenstiev, pri ktorom sú jednotlivé častice látky relatívne ďaleko od seba, voľne sa pohybujú v priestore a pôsobia na ne zanedbateľne malé príťažlivé sily.

V porovnaní s kvapalinami a tuhými látkami majú plyny omnoho menšiu hustotu a viskozitu a sú stlačiteľné.

Na zjednodušené skúmanie vlastností plynov sa používa **ideálny plyn**. **Skutočný plyn (reálny)** má na rozdiel od plynu ideálneho aj viskozitu, teda vnútorný mechanický odpor a nedá sa úplne stlačiť.

Ideálny plyn

Ideálny plyn je teoretický model, ktorý opisuje hypotetickú hmotu v plynnom skupenstve. Je zjednodušením, ktoré sa používa vo fyzike pri štúdiu reálnych plynov.

Zjednodušenie spočíva v tom, že zatiaľ čo molekuly reálneho plynu na seba navzájom pôsobia silami, **pri ideálnom plyne toto silové pôsobenie zanedbávame**. Molekuly ideálneho plynu sa preto medzi jednotlivými zrážkami pohybujú priamočiara.

Teoretické vlastnosti ideálneho plynu dostatočne presne vystihujú vlastnosti reálneho plynu pri nižších hustotách a tlakoch a stredných teplotách. Priblíženie ideálneho plynu prestáva byť presné najmä pri vysokých hustotách.

Vlastnosti látok v plynnom skupenstve:

Z hľadiska *fyzikálneho popisu* je plynné skupenstvo *najjednoduchšie*. Budeme sa opierať o **molekulárne - kinetickú teóriu ideálnych plynov** (plynov za „nie príliš vysokých“ tlakov a teplôt). Ide o *klasickú (nie kvantovú!)* teóriu, ktorej základné predpoklady sú:

- ▶ **molekuly plynov** (základné stavebné častice) **považujeme za dokonale pružné guľičky**
- ▶ **pohybujú sa náhodne všetkými smermi**
- ▶ **ich rozmery sú veľmi malé oproti ich priemerným vzdialenostiam**
- ▶ **okrem priamych, dokonale pružných zrážok, na seba nepôsobia (ako „biliardové gule“)**

Stavové veličiny

Pre fyzikálny popis **stavu** určitého množstva ideálneho plynu postačujú (pri zjednodušenom prístupe) *tri stavové veličiny*:

- **tlak p**
- **teplota T** (v absolútnej – Kelvinovej – stupnici, tzv. termodynamická teplota)
- **objem V**

Ideálny plyn

Zjednodušená predstava o pohybe molekúl a stavových veličinách v ideálnom plyne:

- ▶ **tlak plynu** - súhrnný účinok nárazov molekúl na steny nádoby
- ▶ **teplota plynu** – miera strednej rýchlosti pohybu molekúl

Stavové veličiny **nie sú** nezávislé – spája ich určitý vzťah

tzv. **stavová rovnica:**

$$pV = NkT$$

p je tlak

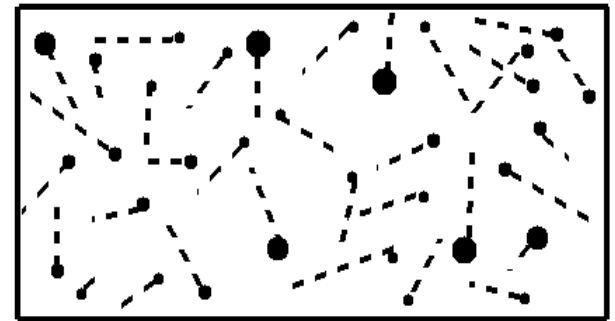
V je objem

N je celkový počet častíc plynu (molekúl)

k je Boltzmannova konštanta = $1.381 \cdot 10^{-23}$ [J · K⁻¹]

T je teplota.

Stavová rovnica sa odvádza pomocou kinetickej teórie plynov.



Ideálny plyn

Stavovú rovnicu ideálneho plynu pre jeho hmotnostné množstvo n mólov (látkové množstvo) môžeme písať aj ako:

$$pV = nRT$$

kde R je univerzálna plynová konštanta: $R = 8.314 \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}\text{]}$

Univerzálna preto, lebo **platí pre ľubovoľný plyn aj zmes plynov**, bez ohľadu na chemické zloženie, ak uvažujeme hmotnostné množstvo v móloch (v prípade zmesi treba uvažovať priemernú molekulárnu hmotnosť). Je súčinom Boltzmanovej a Avogadrovej konštanty.

Stavová rovnica je jednou zo základných rovníc termodynamiky a popisuje ako navzájom súvisia jednotlivé stavové veličiny.

Toto je veľmi užitočné, nakoľko nám to umožňuje pre danú zmenu jednej zo stavových veličín predpovedať, ako sa budú správať ostatné stavové veličiny.

Ludwig Boltzmann



Ludwig Boltzmann



◀ **Ludwig Boltzmann** (1844 – 1906) , rakúsky teoretický fyzik, zakladateľ termodynamiky a štatistickej mechaniky. Významne prispel k rozvoju kinetickej teórie plynov, elektromagnetizmu a termodynamike. Prvý odvodil konštantu v stavovej rovnici – pre prípad, že hmotnostné množstvo plynu uvažujeme cez počet molekúl (spojitosť s tzv. Avogadrovým číslom). Boltzmann spáchal v roku 1906 samovraždu. Pravdepodobne svoju úlohu zohralo odmietnutie jeho práce veľkou časťou fyzikálnej komunity.

Odvodil tzv. Boltzmannovu konštantu a vzťah pre výpočet entropie.

Reálny plyn

Každý plyn s ktorým sa stretávame (**reálny**) v prírode sa do určitej miery líši od **ideálneho**. Mnohé plyny sa však za normálnych podmienok líšia len nepatrne (napr. vodík a hélium).

Napriek tomu, že skutočný plyn (reálny) nemôžeme úplne stlačiť a má na rozdiel od plynu ideálneho aj vnútorný mechanický odpor môžeme zákonitosti platné pre ideálny plyn použiť aj na vyšetrenie reálnych plynov. V niektorých prípadoch sa zavádzajú do rovníc opravy.